

道路ネットワークにおける移動時間信頼性を考慮した便益評価の実用化に向けた課題と展望

内田 賢悦¹

¹正会員 北海道大学大学院 工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail: uchida@eng.hokudai.ac.jp

本稿では、道路ネットワーク上の移動時間信頼性に影響する要因を整理すると共に、筆者が提案してきた手法を中心に、移動時間信頼性を考慮した交通プロジェクトの便益評価のための要素技術を紹介する。さらに、移動時間信頼性を考慮した交通プロジェクトの便益評価の実用化に際して、関係する推計手法が満たすべき条件を整理し、その実用化に向けた課題と展望をまとめることを試みる。

Key Words : *travel time reliability, benefit analysis, value of travel time, value of travel time reliability*

1. はじめに

道路ネットワークにおいてドライバーの経路選択行動を考慮して移動時間信頼性 (travel time reliability) を解析する研究は、朝倉ら¹⁾、Asakura & Kashiwadani²⁾ によって始まった (travel time reliabilityは、所要時間信頼性、旅行時間信頼性などと訳される場合が多いが、本稿では、移動時間信頼性と訳すことにする)。これらの研究では、利用者均衡配分問題において交通需要が確率的に変動する問題を設定し、利用者均衡の概念をベースとした道路ネットワークにおける移動時間信頼性の解析を行っている。その解法として、利用者均衡配分問題の解法にモンテカルロシミュレーション技術を組み合わせた方法を適用している。これらの研究が契機となり、交通ネットワークにおける移動時間信頼性に関する研究は、国内外を問わず、多くの研究者によって進められてきた。たとえば、モンテカルロシミュレーション技術の適用を必要としない効率的な移動時間信頼性推計手法が開発されてきた。さらには、移動時間の変動要因である、確率的に変動する交通需要および交通容量に関する推計技術だけではなく、交通ネットワークにおける時間価値・時間信頼性価値の推計技術等、道路ネットワークにおける移動時間信頼性を考慮した便益評価に関わるさまざまな要素技術も開発されてきた。すなわち、道路ネットワークにおける移動時間信頼性の推計技術だけではなく、それを貨幣価値化する便益推計技術も大きく進展してきたといえる。

そもそも移動時間信頼性とは何であろうか？道路ネットワークにおいて、固定された起終点 (OD) 間を移動

する際、移動時間が日々変動していることは、多くの人が経験している事実であろう。ネットワーク上の移動時間の決定要因が何らかの原因により確率的に変動する場合、その結果、移動時間も確率的に変動することになる。移動時間信頼性とは、そうした確率的に変動する移動時間のばらつき (または不確実性) の程度を意味する。より厳密には、全く同じ季節・曜日・時間 (帯) であったとしても移動時間は確率的に変動するが、移動時間信頼性とは、そうした移動時間の確率的変動の程度を定量化したものである。したがって、季節・曜日・時間 (帯) などによって移動時間が変化する場合があるが、一般的に、そうした移動時間の変化を移動時間の確率変動とは考えない。なぜなら、たとえば、朝の時間帯と昼の時間帯で移動時間が異なるのは、交通需要 (の平均値) が変化した結果と解釈でき、そうした状況下では、朝の時間帯では30分、昼の時間帯では20分というように、移動時間に関する不確実性は存在しないとも考えることもできるからである。移動時間信頼性の指標は、一義的に定められているわけではなく、確率的移動時間の標準偏差、分散、パーセンタイル値などが用いられる場合が多い。

ネットワーク上で移動時間が確率変動する場合、ドライバーは不確実性下の交通行動を強いられることになる。ネットワーク上のドライバーの交通行動に影響する不確実性は、大別すると、需要面、供給面およびドライバーの移動時間に関する認知に存在すると考えられている³⁾。需要面、供給面の変動要因として、それぞれOD交通量 (交通需要)、リンク交通容量が挙げられる。主にこれらの要因の確率変動によって、ドライバーが経験する移

動時間の確率的変動、すなわち、移動時間信頼性が決定されると考えることができる。移動時間が確率的に変動する世界では、ドライバーは移動時間を正確に予測することはできないと考えられる。これは、どんなにITS技術が進化したとしても同様である。なぜなら、ドライバーが移動時間を正確に予測するためには、移動時間の確率的変動特性（たとえば、確率分布）を正確に推計（予測）するだけでなく、その確率分布からランダムに生じる移動時間までも正確に予測することが必要となる。後者の予測は、「神のみぞ知る」とされる領域であり、学術的研究の余地はほとんどないと考えられる。一方、ドライバーの認知移動時間に関する不確実性（認知誤差）は、ドライバーが経験する移動時間に直接関係するものではなく、経路選択基準に対するドライバー間の認知の違いを表現していると考えられる⁴⁾。そのため、直接的に移動時間信頼性に影響を与えることはないが、ドライバーの経路選択行動を経由して、間接的に移動時間信頼性に影響することになる。

では、ドライバーが経験あるいは認知する移動時間に不確実性が存在する場合、ドライバーの交通行動はどのように決定されるであろうか。一般的に、ドライバーは目的地への早着、遅着を避けたいと考えるであろう。そこでまず挙げられるのが、出発時刻を変更するという行動である。こうした行動により、目的地への到着時間はある程度制御することが可能となる。さらに、リスク（不確実性）回避的なドライバーは、移動時間の不確実性が高い経路を避けたいとも考えるであろう。完全情報下の移動時間を想定した場合であっても、すなわち、移動時間の確率分布を正確に予測できると想定した場合であっても、そこからランダムに生じると考えられる移動時間までは予測不可能であるため、リスク回避的なドライバーはそうした行動をとることになる。認知移動時間に不確実性が存在しない場合、後に示されるように、リスク回避的なドライバーの経路選択行動は、確定的モデルによって記述することができる。確定的モデルは、（確定的）利用者均衡配分と同様な構造を有する問題として定式化可能であり、本稿では確定的モデルの適用を前提とした議論を今後進めていくことにする。一方、ドライバーの認知移動時間に不確実性が存在する場合、ドライバーの経路選択行動は、確率的モデルによって記述することができる。確率的モデルは、確率的利用者均衡配分と同様な構造を有する問題として定式化可能であるが、本稿では割愛する。興味のある読者は、内田³⁾を参照されたい。

一般的にネットワークにおいて交通プロジェクトを実施した場合、現在採用されている三便益（走行時間短縮、走行経費減少、交通事故減少）⁵⁾以外に時間信頼性向上

便益も発生すると考えられる。移動時間信頼性向上便益を推計するためには、交通プロジェクトによる移動時間信頼性向上効果を定量的に推計するだけでなく、その効果を貨幣価値化する必要がある。効果の貨幣価値化の目的は、交通プロジェクトに要する費用と比較することによって、その投資効率性評価を行うことであることはいうまでもない。上記の三便益も同様な手続きによって効果の貨幣価値化が行われている。では、移動時間信頼性向上便益を推計できると仮定した場合、交通プロジェクトによる便益は、従来のものからどのように変化するであろうか。以下では、移動時間に着目した例を示そう。はじめに、ネットワーク上の確率的総移動時間（ T ）を次式で与える。

$$T = \sum_{a \in A} t_a(V_a; C_a) \cdot V_a$$

ここで、 A はネットワークを構成するリンクの集合であり、 $t_a(V_a; C_a)$ は、確率的リンク交通容量（ C_a ）を所与とした確率的リンク交通量（ V_a ）の関数として表現されるリンクの移動時間関数である。リンク交通量、リンク交通容量のうち、どちらかが確定的に与えられた場合であっても、リンクの移動時間および総移動時間は確率変数として表現されることに注意されたい。一般的に、交通プロジェクトの実施によって確率的総移動時間の平均、分散は、両方ともに減少すると考えられる（図-1）。

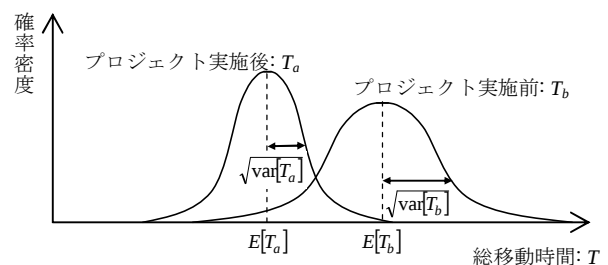


図-1 総移動時間の確率分布

交通プロジェクトによる効果の多くは、総移動時間の短縮効果によるものである。総移動時間が確率分布している場合、時間価値を t と表現すると、移動時間短縮による便益は、確率的総移動時間の平均の変化から推計され、次式から推計される。

$$b = t \cdot (E[T_b] - E[T_a])$$

ここで T_b 、 T_a はそれぞれ、プロジェクト実施前、実施後の確率的総移動時間である。上記のように推計される時間短縮便益は、現在の評価法で推計される便益と近い値をとるものと考えられる。さらに移動時間信頼性も考慮した場合、たとえば、時間信頼性の指標を確率的総移動

時間の分散 ($\text{var}[T]$) とし、さらに、時間信頼性価値を u と表現すると、移動時間信頼性向上効果も含めた交通プロジェクトによる便益は、次式から推計されることになる。

$$b^* = t \cdot (E[T_b] - E[T_a]) + u \cdot (\text{var}[T_b] - \text{var}[T_a])$$

移動時間信頼性向上による便益を推計するためには、信頼性向上効果を貨幣換算するための時間信頼性価値の推計が不可欠となる。SPデータとRPデータを用いて時間価値を推計したところ、SPデータによる時間価値はRPデータによる時間価値の約半分となるケースが報告されている⁹⁾。このように、SPデータには多種のバイアスが含まれ、データの信頼性に課題が残されているため、時間価値も同様であるが、時間信頼性価値は、観測データ (RPデータ) に基づいて推計されることが望ましいと考えられる。また、SPデータから時間信頼性価値を推計しようとする場合、移動時間信頼性の指標として標準偏差や分散を用いた場合には、被験者はその意味を理解しづらいため、適切な回答を妨げてしまう可能性がある。こうした理由等から、多くの研究において時間信頼性の指標として、パーセンタイル値が妥当であると指摘されている^{7,9)}。また時間信頼性の指標についても多くの議論がなされている⁹⁾。SPデータの適用を前提とした場合には、筆者もパーセンタイル値が妥当であるとする意見に関しては、基本的に賛成である。しかし、移動時間信頼性の指標如何によらず、ネットワークレベルで観測データに基づいて時間価値・時間信頼性価値を適切に推計できれば、それに越したことはないとも筆者は考えている。さらに、ネットワーク上のリスク回避的なドライバーの経路選択行動は、時間価値・時間信頼性価値と密接に関係しているため、それらは本来、ネットワークレベルでドライバーの経路選択行動を内生化したフレームワークを適用して推計されるべきであろう。

本稿では、特に道路ネットワークに焦点を当て、ネットワーク上の移動時間信頼性に影響する要因を整理すると共に、筆者が提案してきた手法^{3, 10-12)}を中心に、移動時間信頼性向上便益の評価に必要な要素技術を紹介する。さらに、移動時間信頼性を考慮した便益評価の実用化に際して、関係する推計手法が満たすべき条件を整理すると共に、その実用化に向けた課題と展望をまとめることを試みたい。本稿の構成は以下に示す通りである。第2章では、本稿を通して多く使われる記号を示す。第3章では、ネットワーク上のドライバーが経験する移動時間信頼性への影響要因、すなわち確率的OD交通量と確率的リンク交通容量を実データから推計する方法を紹介する。第4章では、不確実性下におけるリスク回避的なドライバーの経路選択行動の定式化を示す。第5章では、

交通均衡概念に基づき、観測リンク交通量から時間価値・時間信頼性価値を同時推計するネットワークモデルを示す。第3章から第5章までに示す方法を適用することにより、①移動時間信頼性に影響を与える不確実性、②不確実性下のリスク回避的なドライバーの経路選択行動および③観測データに基づく時間価値・時間信頼性価値が推計可能となることが示される。つまり、技術的には (机上では)、移動時間信頼性を考慮した便益評価は可能であることが示される。これに対し第6章では、現時点で実用化に耐え得ると考えられる移動時間信頼性を考慮した便益推計法が満たすべき条件をまとめると同時に、残された課題についても言及する。第7章では、本稿のまとめを行い、移動時間信頼性を考慮した便益評価に関わる展望を示す。なお当初は、本稿に道路ネットワークにおける時間信頼性研究に関するレビューを含めることを検討したが、詳細かつ包括的なレビュー論文^{7,9)}が最近発表されたため、これに関しては、そちらに譲ることにしたい。その代わりに本稿は、移動時間信頼性向上便益の評価に関わる要素技術に焦点を当てるが、それぞれの要素技術の説明には深入りせずに横断的な説明を行った上で、移動時間信頼性を考慮した交通プロジェクトの便益評価の実用化に向けた課題と展望を示すことを主目的としている。

2. 記号

本稿を通して使用する主な記号は、以下に示す通りである。

A	ネットワーク上のリンク集合
I	ODペアの集合
J_i	ODペア i 間の経路集合
d_{aj}	リンク a が経路 j の一部であれば 1, それ以外のときに 0 をとる変数。
Q_i	ODペア i 間の確率的交通需要
q_i	ODペア i 間の確定的交通需要
F_{ij}	ODペア i 間の経路 j の確率的交通量
f_{ij}	ODペア i 間の経路 j の確定的交通量
V_a	リンク a の確率的交通量
v_a	リンク a の確定的交通量
$\hat{v}_a$	リンク a の観測交通量
p_{ij}	ODペア i 間の交通需要が経路 j を選択する確率
C_a	リンク a の確率的交通容量
$t_a(\cdot)$	リンク a の移動時間関数
$r_a(\cdot)$	リンク a の移動費用関数

- $s_a^2(\cdot)$ リンク a の移動時間の分散
 $s_{ab}^2(\cdot)$ リンク a と b の移動時間の共分散

3. ネットワークにおける不確実性の推計

第1章で述べたように、ドライバーが経験する確率的移動時間に影響を与える要因として、需要面のOD交通量と供給面のリンク交通容量の確率変動が挙げられる。本章では、観測交通量あるいは観測交通データからそれらの確率分布を推計する方法を紹介する。

(1) 需要面

ここではネットワーク上のリンク交通量が観測可能である場合、それを用いた確率的OD交通量の推計法を紹介する。確率的OD交通量推計における基本的な考え方は以下に示す通りである。OD交通量が互いに独立な確率分布に従うと仮定する。その仮定下では、ネットワーク上のリンク交通量は、リンク上を流れる経路交通量の和として表現される。一方OD交通量は、ODペア間の経路交通量の和として表現されることになる（経路交通量は、OD交通量に経路選択確率を乗じることによって得られる）。その結果、リンク交通量は互いに相関のある多変量確率分布に従うことになる。ここで、OD交通量に特定の理論的分布を仮定すれば、リンク交通量の理論分布が推計できる。経路選択確率を所与とするか内生化するかのバリエーションは存在するが、観測されたリンク交通量が尤も生起しそうなOD交通量の母数（すなわち、平均、分散）を推計すれば、それからOD交通量は得られる。すなわち、観測リンク交通量を所与とした尤度関数が最大化されるようなOD交通量の母数を求めれば良い。また、経路選択確率は適当なモデル（たとえば、ロジットモデル等）を適用すれば、問題内で内生化することも可能である。

以下ではOD交通量に互いに独立なポアソン分布を仮定した場合、ある条件下では、リンク交通量が多変量正規分布によって近似できることを示す。観測リンク交通量を所与とした多変量正規分布の尤度関数を最大化することにより、確率的OD交通量を推計できることになるが、そのための具体的な定式化は行わない。具体的な定式化に興味のある読者は、たとえば、Hazellon^{13, 14}を参照されたい。はじめに、確率的OD交通量から確率的リンク交通量を導くため、以下に示す2つの仮定を置く。

- ある日に実現されるODペア $i \in I$ 間の交通需要は、平均が $E[Q_i]$ の互いに独立なポアソン分布 Q_i に従う。
- ある日に実現するODペア $i \in I$ の交通需要に対して、

ドライバーは経路 $j \in J_i$ を他の経路とは独立に p_{ij} の確率で選択する。

上記の2つの仮定は、 j 番目の経路交通量 F_{ij} は、平均 $E[Q_i]$ 、抽出率 p_{ij} のポアソン過程からのランダムサンプリングとなることを示している。すなわち、ODペア $i \in I$ 間の経路交通量 F_{ij} ($j \in J_i$) は、互いに独立なポアソン分布に従い、その平均、分散は、それぞれ次式で与えられる。

$$E[F_{ij}] = p_{ij} \cdot E[Q_i]$$

$$\text{var}[F_{ij}] = (p_{ij})^2 \cdot \text{var}[Q_i]$$

このとき、ネットワーク上のリンク $a \in A$ 上の交通量 (V_a) は、次式で与えられる。

$$V_a = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} d_{aj} \cdot F_{ij} \quad \forall a \in A$$

ここで d_{aj} は、経路 j にリンク a が含まれる場合に1、それ以外のときに0をとる変数である。また、上述した2つの仮定より、リンク交通量の平均、分散・共分散は、それぞれ下式で与えられる。

$$E[V_a] = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} d_{aj} \cdot E[F_{ij}] \quad \forall a \in A$$

$$\text{cov}[V_a, V_b] = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} d_{aj} \cdot d_{bj} \cdot \text{var}[F_{ij}] \quad \forall a, b \in A$$

ここで、 $V_a \quad \forall a \in A$ もまたポアソン分布に従うため、その分散は平均と等しく、 $\text{var}[V_a] = E[V_a]$ となることに注意が必要である。次に、 $E[Q_i]$ がある程度大きな値をとることを仮定すると、リンク交通量は、上記の平均、分散・共分散を有する多変量正規分布 $\text{MVN}(E[\mathbf{V}], \Sigma^V)$ によって近似することが可能となる^{13, 14, 15}。ここで、 $E[\mathbf{V}]$ 、 Σ^V は、それぞれ a 番目の要素が $E[V_a]$ となる平均ベクトル、 a 行 b 列の要素が $\text{cov}[V_a, V_b]$ となる分散・共分散行列である。

(2) 供給面

ここではリンクの交通データから確率的交通容量を推計する方法を紹介する。交通容量は、時間交通容量を表わすものとする。交通容量を推計する1つの方法として、道路が本来有する交通処理能力よりも低下した状態 (Traffic Breakdown) の判断基準を事前に設定し、それに基づいて推計を行うものが挙げられる。この方法には、観測交通データから直接Traffic Breakdown 確率を推計する方法や確率的モデルに基づいて交通容量の確率分布を推計する方法がある^{16, 17}。一方、事前にTraffic Breakdown等の交通容量に関する基準を与えずに、自動車の追従方程式から得られるマクロ交通流モデルを適用して交通容量を推計する方法^{10, 18, 19}もある。以下では、観測交通データがあれば比較的簡単に確率的交通容量を推計可能な内

田¹⁰で提案された方法を紹介する。一方、確率的交通容量の共分散もネットワーク上の移動時間信頼性に大きな影響を与えるため、内田¹⁰では、確率的交通容量の共分散を推計する方法も提案されている。この推計法は、紙面の制約から割愛するが、興味のある読者は内田¹⁰を参照されたい。

a) 仮定

自動車の追従方程式の一般化形と位置づけられる GM モデル^{20,24)}から導かれるマクロ交通流モデルに交通流観測データを適用し、確率的交通容量を推計することを考える。はじめに、交通容量の確率変動（分散）に影響を与える要因として、以下に示す2つを想定する。

- ・ 追従行動に影響を及ぼすが、追従方程式において表現されていない未知パラメータが存在する（以下では、要因 e と呼ぶことにし、それによる確率的交通容量の分散を s_e^2 によって表す）。
- ・ 追従方程式において表現されているパラメータ自体が確率変数となっている（以下では、要因 p と呼ぶことにし、それによる確率的交通容量の分散を s_p^2 によって表す）。

また、ネットワーク上のリンクの確率的交通容量（ C ）の分散（ $\text{var}[C]$ ）は、次式で与えられるものと仮定する。

$$\text{var}[C] = s_e^2 + 2 \cdot s_{e,p} + s_p^2$$

ここで $s_{e,p}$ は、要因 e と p に起因する共分散である。したがって、確率的交通容量は、その平均を $E[C]$ とすると、式(1)に示す正規分布に従うことになる。

$$C \sim N(E[C], \text{var}[C]) \quad (1)$$

b) 未知パラメータによる交通容量の変動

GM モデルにいくつかの境界条件を与えると、式(2)に示すように、密度（ k ）と空間速度（ s ）（以下では単に速度とする）の平均値の関係を表すマクロ交通流モデル（ $k-s$ 曲線）が得られる（図-2）。

$$s(k) = s_f \cdot \left(1 - \left(\frac{k}{k^j} \right)^{l-1} \right)^{\frac{1}{1-m}} \quad (2)$$

ここで k^j は、飽和密度である。また、 s_f は自由走行速度、 l 、 m はパラメータであり、これらは、後述する最小二乗法により推計されるモデルパラメータである。いま、交通流観測データセットは n 個あり、速度、密度、交通流率が得られているものとし、 i 番目のデータセットを（ s^i, k^i, x^i ）と表現することにしよう。速度（ s^i ）は、要因 e の影響により変動し、次式で与えられるものと仮定する。

$$s^i = s(k^i) + e^i$$

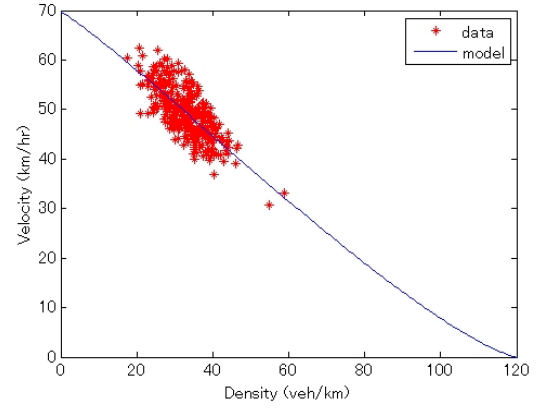


図-2 $k-s$ 曲線

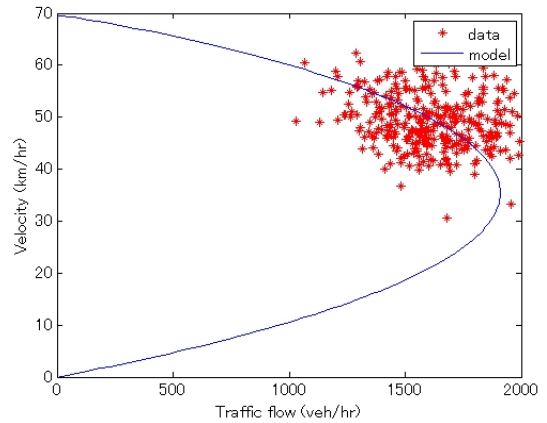


図-3 $x-s$ 曲線

where $e^i \sim N(0, s^2)$ ($i=1, \dots, n$), $\text{cov}(e^i, e^j) = 0$ ($i \neq j$) すなわち s^i は、確率変数 $S^i \sim N(s(k^i), s^2)$ からランダムサンプリングされたものと仮定する（図-2）。ここで、 s^2 は回帰式の周りの分散であり、その推計値（ $\hat{s}^2$ ）およびパラメータの推計値（ $\hat{s}_f, \hat{l}, \hat{m}$ ）は、最小二乗法を適用することによって得られる。したがって、確率的速度 $S(k)$ は、式(3)に示す正規分布に従うことになる。

$$S(k) \sim N(s(k), \hat{s}^2) \quad (3)$$

一方、交通量保存則（ $x = k \cdot s$ ）と式(2)に示した関係から、交通流率と速度の平均値の関係を表す $x-s$ 式が得られる（図-3）。平均交通量が $x-s$ 式によって与えられることを仮定すると、要因 e による確率的交通容量の平均（ $E[C]$ ）は、次式で与えられる。

$$E[C] = \max(x) = k^j \cdot s^0 \cdot \left(1 - \left(\frac{s^0}{\hat{s}_f} \right)^{1-\hat{m}} \right)^{\frac{1}{\hat{l}-1}}$$

ここで s^0 は、次式を満たす臨界速度である。

$$\left. \frac{\partial x}{\partial s} \right|_{s=s^0} = 0$$

また、確率的交通容量の平均においては、臨界密度 (k^0) は、次式で与えられる。

$$k^0 = \frac{E[C]}{s^0}$$

導出過程は割愛するが、要因 e による確率的交通容量は式(4)に示す正規分布に従うことになる。

$$N(E[C], s_e^2) = N(E[C], (k^0)^2 \cdot \hat{s}^2) \quad (4)$$

c) 確率的パラメータによる交通容量の変動

前項で示した最小二乗法から推計されるマクロ交通流モデルのパラメータは、確率変数の平均値であると捉えることができる。ここでは、パラメータの分散・共分散を推計することによって、確率的パラメータによる交通容量の分散を推計することを考える。はじめに、パラメータ値の分散・共分散行列を推計することにする。式(2)をパラメータ s_f, l, m に関して偏微分した項 ($\partial s / \partial s_f, \partial s / \partial l, \partial s / \partial m$) を求める。さらに、これらの偏微分係数に $k = k^i$ ($i = 1, \dots, n$) を代入したものをそれぞれ $\hat{z}_{s_f, i}, \hat{z}_{l, i}, \hat{z}_{m, i}$ と表わすことにし、これらを用いて次式に示す行列 $\mathbf{Z}$ を定義する。

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} \hat{z}_{s_f, 1} & \hat{z}_{l, 1} & \hat{z}_{m, 1} \\ \hat{z}_{s_f, 2} & \hat{z}_{l, 2} & \hat{z}_{m, 2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \hat{z}_{s_f, n} & \hat{z}_{l, n} & \hat{z}_{m, n} \end{pmatrix}$$

パラメータの分散共分散行列 ($\mathbf{V}$) は、 $\mathbf{Z}$ を用いて次式によって推計できる²⁵⁾。

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} s_{s_f}^2 & s_{s_f, l} & s_{s_f, m} \\ s_{l, s_f} & s_l^2 & s_{l, m} \\ s_{s_f, m} & s_{l, m} & s_m^2 \end{pmatrix} = (\mathbf{Z}^T \mathbf{Z})^{-1} \cdot \hat{s}^2$$

ここで、上付きの T は、ベクトルの転置操作を表している。導出過程は割愛するが、要因 p による確率的交通容量は、式(5)に示す正規分布に従うことになる。

$$N(E[C], s_p^2) = N(E[C], (r)^2 \cdot \hat{s}^2) \quad (5)$$

where

$$(r)^2 = \boldsymbol{\delta}^T (\mathbf{Z}^T \mathbf{Z})^{-1} \boldsymbol{\delta}$$

$$\boldsymbol{\delta} = \left(\frac{\partial x}{\partial s_f} \quad \frac{\partial x}{\partial l} \quad \frac{\partial x}{\partial m} \right)^T \bigg|_{s=s^0, s_f=\hat{s}_f, l=\hat{l}, m=\hat{m}}$$

d) 確率的交通容量の変動

導出過程は割愛するが、式(1)に示した確率的交通容量は、式(6)に示す正規分布に従うことになる。

$$C \sim N(E[C], \text{var}[C]) = N(E[C], (k^0 + r)^2 \cdot \hat{s}^2) \quad (6)$$

式(6)は、臨界密度 (k^0) とパラメータの確率変動による影響度 (r) を推計できれば、回帰式の周りの分散 ($\hat{s}^2$) は最小二乗法から得られるため、それらから確率的交通容量の分散は容易に推計可能であることを示している。

4. リスク回避的なドライバーの経路選択行動

ここでは、平均移動時間、平均移動費用および移動時間信頼性から構成される経路評価値に基づく、リスク回避的なドライバーの経路選択行動の定式化を示す。

(1) 移動時間

ネットワーク上のリンク移動時間は、確率的交通容量 C_a を所与とした確率的交通量 V_a の関数、すなわち、 $t_a(V_a; C_a)$ で表現されると仮定する。OD ペア i 間の経路 j の移動時間 ($\tilde{\Xi}_{ij}$) は、その経路を構成するリンク移動時間の和として次式で与えられる。

$$\tilde{\Xi}_{ij} = \sum_{a \in A} t_a(V_a; C_a) \cdot d_{aj} \quad \forall i \in I, \forall j \in J_i$$

経路移動時間の平均、分散はそれぞれ式(7)、(8)で与えられる。

$$E[\tilde{\Xi}_{ij}] = \sum_{a \in A} E[t_a(V_a; C_a)] \cdot d_{aj} \quad \forall i \in I, \forall j \in J_i \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{var}[\tilde{\Xi}_{ij}] &= \sum_{a \in A} \text{var}[t_a(V_a; C_a)] \cdot d_{aj} \\ &\quad + 2 \cdot \sum_{a \in A} \sum_{b \neq a} \text{cov}[t_a(V_a; C_a), t_b(V_b; C_b)] \cdot d_{aj} \cdot d_{bj} \\ &= \sum_{a \in A} s_a^2(V_a; C_a) \cdot d_{aj} \\ &\quad + 2 \cdot \sum_{a \in A} \sum_{b \neq a} s_{ab}(V_a, V_b; C_a, C_b) \cdot d_{aj} \cdot d_{bj} \end{aligned} \quad \forall i \in I, \forall j \in J_i \quad (8)$$

(2) 移動費用

移動費用に影響を与える要因としては、燃料代、自動車の維持管理費用などが考えられる。ここでは、ネットワーク上のリンクの移動費用は、確率的交通容量 C_a を所与とした確率的交通量 V_a の関数、すなわち、 $r_a(V_a; C_a)$ によって表現されると仮定する。OD ペア i 間の経路 j の移動費用 ($\tilde{\Gamma}_{ij}$) は次式で与えられる。

$$\tilde{\Gamma}_{ij} = \sum_{a \in A} r_a(V_a; C_a) \cdot d_{aj} \quad \forall i \in I, \forall j \in J_i$$

経路の平均移動費用は、式(9)で与えられる。

$$E[\tilde{\Gamma}_{ij}] = \sum_{a \in A} E[r_a(V_a; C_a)] \cdot d_{aj} \quad \forall i \in I, \forall j \in J_i \quad (9)$$

(3) 経路選択問題の定式化

Fosgerau & Engelson²⁰⁾に従い、本研究では移動時間信頼性の指標として移動時間の分散を採用する。不確実性を嫌うリスク回避的なドライバーは、平均移動時間（式(7)）、平均移動費用（式(9)）だけではなく、移動時間信頼性（式(8)）も考慮に入れて経路選択を行うものと考えられる。したがって、経路選択に用いられる経路評価値は、平均移動時間、平均移動費用および移動時間信頼性の3指標から構成され、パラメータ $l > 0, g > 0$ and $w > 0$ を用いて、式(10)で与えることができる。

$$\tilde{c}_{ij}(\mathbf{F}) = l \cdot E[\Xi_{ij}] + w \cdot E[\Gamma_{ij}] + g \cdot \text{var}[\Xi_{ij}] \quad (10)$$

ドライバーは経路評価値が最小となる経路を選択すると想定できる。この場合、リスク回避的なドライバーの経路選択問題は、確率的経路交通量ベクトル $\mathbf{F} = (F_{11}, \dots, F_{ij}, \dots)^T$ を用いて、以下に示す非線形相補性問題として定式化できる¹²⁾。

$$\text{find } \mathbf{z} = (\mathbf{F}^* \quad \mathbf{d}^*)^T \text{ such that } \hat{\mathbf{z}} \geq \mathbf{0}, \mathbf{h}(\hat{\mathbf{z}}) \geq \mathbf{0}, \hat{\mathbf{z}}^T \mathbf{h}(\hat{\mathbf{z}}) = 0$$

where

$$\mathbf{F} = (F_{11} \quad \dots \quad F_{1|j|} \quad \dots \quad F_{|i|1} \quad \dots \quad F_{|i||j|})^T$$

$$\mathbf{d} = (d_1 \quad \dots \quad d_{|i|})^T$$

$$\hat{\mathbf{z}} = (E[\mathbf{F}] \quad \mathbf{d})^T$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{z}) = (\mathbf{g} \quad \mathbf{q})^T$$

$$\mathbf{g} = (\tilde{c}_{11}(\mathbf{F}) - d_1 \quad \dots \quad \tilde{c}_{|i||j|}(\mathbf{F}) - d_{|i|})^T$$

$$\mathbf{q} = \left(\sum_{j \in J_i} E[F_{1j}] - E[Q_i] \quad \dots \quad \sum_{j \in J_{|i|}} E[F_{|i|j}] - E[Q_{|i|}] \right)^T$$

上記の定式化では、変数ベクトルに上付きの*が付された場合、その変数ベクトルが均衡状態のものであることを意味している。この表記法は、今後も踏襲することにする。 $\mathbf{d}$ は、OD間の利用される経路評価値ベクトルであり、経路評価値は式(10)から計算され、上記の定式化では、リスク回避的なドライバーは経路評価値が最小となる経路を選択することが表現されている。より定式化に忠実に表現すると、上記の定式化は、ODペア $i(i \in I)$ 間で利用される経路評価値は全てに等しく d_i^* となり、それは利用されない経路評価値よりも小さいかせいぜい等しくなることを示しており、利用者均衡配分の自然な拡張となっている点に注意が必要である。相補性問題の解法については、Watling⁴⁾, Lo & Chen²⁷⁾を参照されたい。一般的に、相補性問題として定式化されたリスク回避的な

ドライバーの経路選択問題では、解の一意性の保証されない、すなわち、リンク交通量を一意的に決定できない問題となっている点にも注意が必要である。このことは、後に示すように、便益推計という観点において、重要な意味をもつことになる。

5. 道路ネットワークにおける時間価値・時間信頼性価値の推計

交通行動における時間価値を理論的に扱う先駆的な研究として、Becker²⁸⁾やDeSerpa²⁹⁾などが挙げられる。最近では、Fosgerau & Karlström³⁰⁾は、スケジューリング選好に基づく時間信頼性価値を導出している。またFosgerau & Engelson²⁶⁾は、移動の起点と終点それぞれにおいて時間的に変動する線形効用を想定し、それから定義されるスケジューリング選好に基づいた時間信頼性価値を分析している。しかしながら、筆者の知る限り、ネットワークレベルでリスク回避的なドライバーの経路選択行動を内生化した上で、時間価値・時間信頼性価値を推計あるいは分析した例はない。以下では、ネットワークレベルでリスク回避的なドライバーの経路選択行動を内生化した上で、時間価値・時間信頼性価値を同時推計する方法¹²⁾を紹介する。

(1) 経路評価値がリンク毎に分離可能となる場合

a) 独立な確率的リンク交通容量下の変数表現

本節では、OD交通量が確定的に与えられている状況を想定し、それを q_i と表現することにする。その場合、経路交通量は式(11)で表現される。

$$f_{ij} = p_{ij} \cdot q_i \quad \forall i \in I, \forall j \in J_i \quad (11)$$

一方、リンク交通容量 $C_a(a \in A)$ は、平均、分散がそれぞれ $E[C_a](a \in A)$, $\text{var}[C_a]$ で表現される互いに独立な正規分布に従う状況を想定すると、 $\text{cov}[C_a, C_b] = 0$ ($a \neq b \in A$) となる。

リンク交通量 v_a と互いに独立な確率的リンク交通容量 C_a を想定した場合、ODペア i 間の経路 j の確率的経路移動時間 (Ξ_{ij}) は次式で表現される。

$$\Xi_{ij} = \sum_{a \in A} t_a(v_a; C_a) \cdot d_{aj} \quad \forall i \in I, \forall j \in J_i$$

where

$$v_a = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} f_{ij} \cdot d_{aj} \quad \forall a \in A \quad (12)$$

同様に、確率的経路移動費用 (Γ_{ij}) は次式で表現される。

$$\Gamma_{ij} = \sum_{a \in A} r_a(v_a; C_a) \cdot d_{aj} \quad \forall i \in I, \forall j \in J_i$$

確率的経路移動時間および確率的経路移動費用の平均は、それぞれ式(13), (14)で与えられる。

$$E[\Xi_{ij}] = \sum_{a \in A} E[t_a(v_a; C_a)] \cdot d_{aj} \quad \forall i \in I, \forall j \in J_i \quad (13)$$

$$E[\Gamma_{ij}] = \sum_{a \in A} E[r_a(v_a; C_a)] \cdot d_{aj} \quad \forall i \in I, \forall j \in J_i \quad (14)$$

一方、確率的経路移動時間の分散は式(15)で与えられる。

$$\text{var}[\Xi_{ij}] = \sum_{a \in A} s_a^2(v_a; C_a) \cdot d_{aj} \quad \forall i \in I, \forall j \in J_i \quad (15)$$

独立なリンク交通容量 ($\text{cov}[C_a, C_b] = 0 (a \neq b \in A)$) を仮定しているため、以下の関係が成立する³⁰⁾ことに注意が必要である。

$$s_{ab}(v_a, v_b; C_a, C_b) = 0$$

事項b)に示す時間価値・時間信頼性価値の推計法は、リンクの平均移動時間、平均移動費用および移動時間信頼性 ($E[t_a(v_a; C_a)], E[r_a(v_a; C_a)], s_a^2(v_a; C_a)$) は、すべてリンク交通量 v_a に関する単調増加関数であると仮定した方法である。平均移動時間、移動時間信頼性に関しては、一般的に、リンク交通量 v_a に関する単調増加関数となることが期待されるが¹⁰⁾、平均移動費用に関しては、リンク交通量 v_a に関する凸関数となることが知られている³⁰⁾。そうした場合には、次節(2)に示すように、相補性問題による定式化を適用して時間価値・時間信頼性価値を推計する必要がある。

b) 時間価値・時間信頼性価値推計問題の定式化

時間価値・時間信頼性価値の推計問題の定式化に先立ち、以下に示す3つの仮定を設ける。

- A1. ネットワーク上のリンク交通量は計測可能である。
- A2. 計測されたリンク交通量は、平均移動時間、平均移動費用および移動時間信頼性に関する制約下におけるドライバーの効用最大化行動の結果として現れたものである。
- A3. A2で述べた3つの制約は、観測交通量から推計することができる。

私的限界費用に基づく経路選択行動を表現するため、それぞれ平均移動時間、平均移動費用および移動時間信頼性に関する式(16)-(18)に示す3つの仮想変数を導入する。

$$\hat{t}_a(v_a) = \frac{\int_0^{v_a} E[t_a(w; C_a)] \cdot dw}{v_a} \quad (16)$$

$$\hat{r}_a(v_a) = \frac{\int_0^{v_a} E[r_a(w; C_a)] \cdot dw}{v_a} \quad (17)$$

$$\hat{s}_a^2(v_a) = \frac{\int_0^{v_a} s_a^2(w; C_a) \cdot dw}{v_a} \quad (18)$$

そこで、以下に示す問題を考えよう。

[PP: primary problem]:

$$\max u(q_1, \dots, q_{|I|}) = \sum_{i \in I} \int_0^{q_i} \frac{\alpha_i}{w+1} dw \quad (19)$$

s.t.

$$\sum_{i \in I} t_i \cdot q_i \leq f \quad (20)$$

$$\sum_{i \in I} r_i \cdot q_i \leq p, \quad (21)$$

$$\sum_{i \in I} s_i^2 \cdot q_i \leq q, \quad (22)$$

$$q_i + e_i = \tilde{q}_i \quad \forall i \in I \quad (23)$$

and (11), (12), where

$$t_i = \sum_{j \in J_i} \sum_{a \in A} p_{ij} \cdot \hat{t}_a(v_a) \cdot d_{aj} = \sum_{j \in J_i} \sum_{a \in A} \frac{f_{ij}}{q_i} \cdot \hat{t}_a(v_a) \cdot d_{aj} \quad \forall i \in I$$

$$r_i = \sum_{j \in J_i} \sum_{a \in A} p_{ij} \cdot \hat{r}_a(v_a) \cdot d_{aj} = \sum_{j \in J_i} \sum_{a \in A} \frac{f_{ij}}{q_i} \cdot \hat{r}_a(v_a) \cdot d_{aj} \quad \forall i \in I$$

$$s_i^2 = \sum_{j \in J_i} \sum_{a \in A} p_{ij} \cdot \hat{s}_a^2(v_a) \cdot d_{aj} = \sum_{j \in J_i} \sum_{a \in A} \frac{f_{ij}}{q_i} \cdot \hat{s}_a^2(v_a) \cdot d_{aj} \quad \forall i \in I$$

$$f = \sum_{a \in A} \hat{t}_a(\hat{v}_a) \cdot \hat{v}_a$$

$$p = \sum_{a \in A} \hat{r}_a(\hat{v}_a) \cdot \hat{v}_a$$

$$q = \sum_{a \in A} \hat{s}_a^2(\hat{v}_a) \cdot \hat{v}_a$$

式(19)で表わされる目的関数 u は、ネットワーク上での直接効用関数と解釈することができる。なぜなら、目的関数は式(24)のように変換することができ、それはコブダグラス型効用関数³⁰⁾と同形式となるからである。

$$u = \sum_{i \in I} \int_0^{q_i} \frac{\alpha_i}{w+1} dw = \sum_{i \in I} \alpha_i \cdot \ln(q_i + 1) \quad (24)$$

式(24)では、OD 交通量 q_i を代替財と見なしている。 $\alpha_i > 0$ は $\sum_i \alpha_i = 1$ となるパラメータであり、仮定 A2 から、以下に示す関係を満たすものと考えられる。

$$a_i = \frac{(t_i + r_i + s_i^2) \cdot q_i}{\sum_{k \in I} (t_k + r_k + s_k^2) \cdot q_k}$$

上記パラメータは、観測リンク交通量から推計可能な OD 交通量、経路交通量から推計可能であると考えられる。式(24)では、OD ペア i の交通量を $q_i = 0$ とした場合、それらのトリップを終了することによって得られる部分効用を 0、すなわち、 $a_i \cdot \ln(q_i + 1) = 0$ とするため、自然対数の中身は q_i ではなく $q_i + 1$ を用いている。式(23)の $e_i (0 \leq e_i < \bar{q}_i)$ は、超過需要 (Gartner³⁰ 参照) であり、ネットワーク上に表れない OD 交通量である。また $\bar{q}_i$ はそれぞれの OD ペア i に与えられる定数であり、それらは想定される最大交通需要よりも大きな値をとる必要がある。 t_i は、OD ペア i の平均移動時間に関する仮想的な価格と解釈すると、式(20)は平均移動時間に関する予算制約と見なすことができる。同様に r_i, s_i^2 は、それぞれ OD ペア i の平均移動費用、移動時間信頼性に関する仮想的な価格と解釈すると、式(21), (22)はそれぞれ、平均移動費用、移動時間信頼性に関する予算制約と見なすことができる。仮定 A3 から、式(20)-(22)の右辺 (予算) は、観測リンク交通量から計算されていることも示されている。以上から、PP は、ネットワーク上での効用最大化問題に、平均移動時間、平均移動費用および移動時間信頼性に関する予算制約を付加した問題構造となっていることがわかる。

式(12)を式(20)-(22)に示した制約条件に代入すると、それぞれ式(25)-(27)に変換できる。

$$\sum_{a \in A} \int_0^{v_a} E[t_a(w; C_a)] \cdot dw \leq f \quad (25)$$

$$\sum_{a \in A} \int_0^{v_a} E[r_a(w; C_a)] \cdot dw \leq p \quad (26)$$

$$\sum_{a \in A} \int_0^{v_a} s_a^2(w; C_a) \cdot dw \leq q \quad (27)$$

l^*, w^*, g^* をそれぞれ式(25)-(27) に示した制約条件の最適なラグランジュ乗数を表わすものとする。目的関数において、式(25)-(27)の制約条件に関する部分双対化³⁵を行うことによって、これらの最適なラグランジュ乗数を推計することができる。PP は、制約条件(11), (12), (23)の下で、以下に示すラグランジュ関数を最小化する問題と等価となる。

$$\begin{aligned} -v = \min L = & l^* \cdot \left(\sum_{a \in A} \int_0^{v_a} E[t_a(w; C_a)] \cdot dw - f \right) \\ & + w^* \cdot \left(\sum_{a \in A} \int_0^{v_a} E[r_a(w; C_a)] \cdot dw - p \right) \\ & + g^* \cdot \left(\sum_{a \in A} \int_0^{v_a} s_a^2(w; C_a) \cdot dw - q \right) - \sum_{i \in I} \int_0^{q_i} \frac{a_i}{w+1} dw \end{aligned}$$

ここで v は間接効用関数である。上記の問題で定数項を無視すると、PP は以下に示す需要変動型利用者均衡配分と等価な問題に帰着する。

$$\min \hat{L} = \sum_{a \in A} \int_0^{v_a} c_a(w; C_a) \cdot dw + \sum_{i \in I} \int_0^{q_i} d_i(w) \cdot dw$$

s.t. (11), (12) and (23) where

$$c_a(w; C_a) = l^* \cdot E[t_a(w; C_a)] + w^* \cdot E[r_a(w; C_a)] + g^* \cdot s_a^2(w; C_a) \quad (28)$$

$$d_i(w) = \frac{a_i}{\bar{q}_i - w + 1}$$

経路評価値がリンク毎に分離可能な場合、経路を構成するリンクの評価値 (式(28)) を足し合わせることで、式(10)に対応する経路評価値を得ることができる。以上から、式(28)はリスク回避的なドライバーのリンク評価値となっていることがわかる。時間価値、時間信頼性価値はそれぞれ式(29), (30)で与えられる。

$$t = \frac{\partial v / \partial f}{\partial v / \partial p} = \frac{l^*}{w^*} \quad (29)$$

$$u = \frac{\partial v / \partial q}{\partial v / \partial p} = \frac{g^*}{w^*} \quad (30)$$

PP は需要変動型利用者配分と等価な問題構造を有するため、解の一意的性の保証された、すなわち、リンク交通量を一意的に決定できる問題となっている。また、 l^*, w^*, g^* についても一意的に決定できる。これらの解法および詳細な議論に関しては、Uchida¹²⁾ を参照されたい。

(2) 経路評価値がリンク毎に分離可能ではない場合

先述した通り、一般的にリンクの平均移動費用はリンク交通量に関して単調増加関数とはならないことが知られている³⁰⁾。それだけではなく、リンク間の確率的移動時間に相関が存在する場合、経路の移動時間信頼性は、リンクの移動時間信頼性の和とはならないことは式(8)に示した関係からも明らかである。経路の移動時間信頼

性がリンク毎に分離できないのは、確率的リンク移動時間の共分散が0とはならない、すなわち、 $\mathbf{s}_{ab} \neq \mathbf{0}$ となるためである。こうした状況は、確率的OD交通量と相関のある確率的リンク交通容量のうちどちらか、または両方を想定した場合に直面する。したがって、時間価値・時間信頼性価値を推計するに当たって、前節で示したような最適化問題を構成できない。そうした場合、たとえば、確率的OD交通量と相関のある確率的リンク交通容量両方を想定したときには、以下に示す非線形相補性問題として定式化する必要がある。

$$\text{find } \mathbf{z} = (\mathbf{F}^* \quad \mathbf{p}^* \quad \mathbf{e}^*)^T \text{ such that } \hat{\mathbf{z}} \geq \mathbf{0}, \mathbf{h}(\hat{\mathbf{z}}) \geq \mathbf{0}, \hat{\mathbf{z}}^T \mathbf{h}(\hat{\mathbf{z}}) = 0$$

where

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= (F_{11} \quad \dots \quad F_{1|j_{|1|}} \quad \dots \quad F_{1|j_{|1|}} \quad \dots \quad F_{1|j_{|1|}})^T \\ \mathbf{p} &= (l \quad w \quad g)^T \\ \mathbf{e} &= (e_1 \quad \dots \quad e_{|j_{|1|}})^T \\ \hat{\mathbf{z}} &= (E[\mathbf{F}] \quad \mathbf{p} \quad \mathbf{d}(\mathbf{e}))^T \\ \mathbf{d}(\mathbf{e}) &= (d_1(e_1) \quad \dots \quad d_{|j_{|1|}}(e_{|j_{|1|}}))^T \\ \mathbf{h}(\mathbf{z}) &= (\mathbf{g} \quad \mathbf{x} \quad \mathbf{q})^T \\ \mathbf{g} &= (\bar{c}_{11}(\mathbf{F}) - d_1(e_1) \quad \dots \quad \bar{c}_{|j_{|1|}|j_{|1|}}(\mathbf{F}) - d_{|j_{|1|}}(e_{|j_{|1|}}))^T \\ \mathbf{x} &= \left(\sum_{a \in \mathbf{A}} \int_0^{V_a} E[t_a(w; C_a)] \cdot dw - f \quad \sum_{a \in \mathbf{A}} \int_0^{V_a} E[r_a(w; C_a)] \cdot dw - p \right. \\ &\quad \left. \sum_{a \in \mathbf{A}} \sum_{b \in \mathbf{A}} \int_0^{V_a} \int_0^{V_b} s_{ab}(w_a, w_b; C_a, C_b) \cdot dw_a \cdot dw_b - q \right)^T \\ \mathbf{q} &= \left(\sum_{j \in J_1} E[F_{1j}] + e_1 - E[\bar{Q}_1] \quad \dots \quad \sum_{j \in J_{|j_{|1|}}} E[F_{|j_{|1|}j}] + e_{|j_{|1|}} - E[\bar{Q}_{|j_{|1|}}] \right)^T \\ \bar{c}_{ij}(\mathbf{F}) &= l \cdot E[\bar{\Xi}_{ij}] + w \cdot E[\bar{\Gamma}_{ij}] + g \cdot \text{var}[\bar{\Xi}_{ij}] \end{aligned}$$

上記の問題を解くことにより、式(29)、(30)に示すように、時間価値、時間信頼性価値が推計される。相補性問題の解法については、Watling⁹⁾、Lo & Chen²⁷⁾を参照されたい。

6. 移動時間信頼性向上による便益推計

以上では、移動時間信頼性向上による便益評価に関わる要素技術についてまとめた。それらは、①移動時間の変動要因となるネットワークにおける不確実性、②不確

実性下のリスク回避的なドライバーの経路選択行動、③ネットワークレベルの時間価値・時間信頼性価値に関わる推計技術である。移動時間信頼性を考慮した便益評価の実用化、すなわち交通プロジェクト評価への適用を考えると、どのような課題が残されているのであろうか。本章では、上記3要素技術に関わる課題の整理を行ったうえで、移動時間信頼性向上便益の推計法が満たすべき条件を考えてみる。

(1) 不確実性の推計可能性

ネットワークにおける不確実性の推計に関しては、確率的OD交通量と確率的リンク交通容量の推計法をとりあげた。はじめに、需要面を考えてみる。確率的OD交通量の推計法は、ネットワーク上のリンク交通量が観測可能であると仮定した方法であるが、実務でとりあげられているような、数千、数万のリンクからなるネットワークを想定した場合、リンク交通量の観測可能性に課題が残されている。それだけではなく、全てのリンク交通量が所与であったとしても、大規模なネットワークでも容易に計算可能な効率的アルゴリズムの開発が必要であらう。

また、便益評価においては重要となる、将来の（確率的）OD交通量をどのように推計するかについても多くの課題が残されている。将来OD交通量の推計には、将来の人口、経済状況等、これまで考慮する必要がなかった不確実性を新たに考慮する必要があると考えられる。将来OD交通量は、こうした将来状況の予測リスクにも曝されているため、便益自体が確率分布として表現されるような方法を適用することが必要となるであろう。たとえば、将来状況を想定して、生起すると想定される将来のOD交通量とその生起確率を与えると、それぞれのOD交通量に対応した便益が確定的に推計される。ここで注意が必要なのは、OD交通量は確率変数として与えられているにも関わらず、便益は確定的に推計される点である。その便益が生起する確率は、将来OD交通量の生起確率となっていると考えられるため、便益は将来状況リスクを反映したものとなり、確率変数として表現される。より具体的には、確率的OD交通量の平均、分散を現況の交通状況から推計し、さらに平均に関しては将来状況の想定から修正しておく。将来OD交通量は、そうして得られたOD交通量の平均のみがさらに確率変動すると考えることによって、便益が確率変数として表現することが可能となる。また、OD交通量が確定的に与えられる場合であっても、上記の方法は、一般性を失くことなく適用可能である。こうした方法を考えることによって、将来の交通状況に関わる不確実性も踏まえたプロジェクト評価は可能になる考えられるが、これに関しては統一的な方法があるわけではない。

次に供給面に関して考えてみる。第3章で示した供給面、すなわち、確率的交通容量の推計法は、単路部を仮定した方法であり、交通データが得られる場合、比較的容易に確率的交通容量を推計することができる。しかしながら、自動車専用道以外では、単路部とみなせる道路区間は多くは存在しないため、データ収集可能性に難点がある手法であることは否定できない。そのため、できるだけ多くの単路部におけるデータの蓄積が図られることが肝要であろう。こうしたデータの蓄積が進めば、道路の種級、沿道状況に応じて、確率的交通容量（平均交通容量と分散）の標準値を設定することは可能であると考えられる。一方、本稿では紙面の制約から割愛したが、確率的交通容量に関するリンク間の相関（共分散）を推計する方法も内田¹⁰⁾で提案されていることは前述した通りである。確率的交通容量のリンク間相関は、移動時間信頼性に大きな影響を与える重要な要因であると考えられるが、単路部という制約を考えると、ネットワーク上で全てのリンク間の相関を推計することは不可能である。

(2) 経路選択行動の定式化

第4章で定式化を行った不確実性下のリスク回避的なドライバーの経路選択行動は、非線形相補性問題として定式化されており、制約条件付き最適化問題（凸計画問題）として定式化される標準的な利用者均衡配分と異なる定式化が適用されていることに気付いた読者も多いであろう。また、第5章で示した定式化を参考にすると、経路評価値がリンク毎に分離可能な場合、後に示すように、リスク回避的なドライバーの経路選択行動は、標準的な利用者均衡配分と同形式に定式化できることに気付いた読者も多いであろう。非線形相補性問題（あるいは非線形変分不等式としても定式化可能である）不確実性下のリスク回避的なドライバーの経路選択行動は、無意味に問題を複雑化させているわけではない。移動時間信頼性を考える場合、一般的に、経路評価値はリンク評価値の和とはならない、すなわちリンク毎に分離可能ではないため、等価な最適化問題を構成できない。そのため、リスク回避的なドライバーの経路選択行動は、最適性条件を直接記述した相補性問題（あるいはより一般化した変分不等式問題）として定式化する必要があったのである。一方、相補性問題や変分不等式問題は、最適化問題を一般化した問題であるため、一般性を失うことなく、最適化問題（凸計画問題）も表現可能である³⁰⁾。相補性問題や変分不等式問題を解くためには、それらに対応した最適化問題を新たに構成し、それを解く必要がある。また、最適化問題を解くための効率的な解法も多く開発されている³⁰⁾。

リスク回避的なドライバーの経路選択行動は、一般的に、解の一意性の保証されない問題として定式化される

ことは、先述した通りである。解の一意性が保証されない方法を交通プロジェクトの便益評価に適用した場合、どのようなことが起こり得るであろうか。解の一意性が保証されないということは、便益評価値が複数個存在する可能性を意味するため、このことは致命的な問題となり得る。なぜなら、より大きい便益を与える解の存在可能性を否定できないため、最大便益を探し続けなければならない状況が想定されるからである。それだけではなく、プロジェクト評価の透明性、わかりやすさという点でも問題があると言わざるを得ない。

経路評価値がリンク毎に分離可能とならない理由は、第5章でも示した通り、リンク間の確率的移動時間に相関（共分散）が存在するためである。もし、リンク間の確率的移動時間に相関が存在しなければ、式(28)に示したリンク評価値がリンク交通量に関して単調増加関数となる場合には、等価な最適化問題を構成することができる。ここで、式(28)に示したリンク評価値は、関係するパラメータが適切に推計されれば、リンク交通量に関する単調増加関数となることが期待される点は強調したい。経路評価値がリンク毎に分離可能となるための条件は、第5章で示した通り、OD交通量が確定的に与えられ、リンク交通容量は互いに独立な正規分布に従う場合である。その場合、リスク回避的なドライバーの経路選択問題は、通常の利用者均衡配分の移動時間関数を式(28)で置換した以下に示す最適化問題として定式化され、解の一意性は保証される。

$$\min z = \sum_{a \in A} \int_0^{v_a} c_a(w; C_a) \cdot dw \quad (31)$$

s.t. (11), (12).

形式上、式(31)のリンク評価関数には確率変数 C_a が含まれているが、リンク評価値は、リンク交通容量の平均、分散（ $E[C_a]$, $\text{var}[C_a]$ ）を所与とした、リンク交通量 v_a の関数として表現することができる³¹⁾。そのため、リンク評価関数 c_a をリンク移動時間関数とみなすことによって、標準的な利用者均衡配分のアルゴリズムによって容易に解くことが可能である。

本稿では、移動時間信頼性の指標として確率的移動時間の分散を用いているが、ネットワークモデルにおいて、確率的移動時間の分散によって移動時間信頼性を表現することの意義は大きい。なぜなら、確定的OD交通量と互いに独立な確率的リンク交通容量を仮定した場合、経路の移動時間評価値はリンク毎に分離可能となり、リスク回避的なドライバーの経路選択行動は、解の一意性が保証された凸計画問題として定式化できるからである。こうした特徴は、たとえば、確率的移動時間の標準偏差やパーセンタイル値によって移動時間信頼性を表現した場合には、決して得られない。一方で分散は、直観的に

理解しづらい指標であるため、それを用いたパラメータ推計においては、RPデータを前提とする等の工夫は必要であることは言うまでもない。

(3) 時間価値・時間信頼性価値の推計

第5章で示した方法を適用することにより、観測リンク交通量と整合する時間価値・時間信頼性価値をネットワークレベルで推計することは可能であると考えられる。なぜなら、実務で扱われるような大規模ネットワークを対象として時間価値・時間信頼性価値の推計を行う必要性は少ないと考えられ、小規模なネットワーク上では、リンク交通量は比較的容易に観測できると考えられるからである。時間価値・時間信頼性価値を推計する上で重要な点は、ネットワークレベルでリスク回避的なドライバーの経路選択行動を内生化することであると考えられる。時間価値・時間信頼性価値は、経路選択行動に直接影響するため、ネットワークレベルの交通行動を想定した場合、時間価値・時間信頼性価値の推計問題と経路選択問題は、本来切り離して考えてはいけない問題である。

一方では、推計された時間価値が現在の評価マニュアルで採用されている時間価値と大きく異なる場合、過去のプロジェクトの評価結果との比較ができない等、実用上、多くの問題が生じる可能性がある。そのため、時間価値は現行の評価マニュアルで採用されているものを前提とし、第5章で示した推計法は、式(30)を式(29)で除した信頼性比 u/t を推計するために適用するのが妥当であろう。そのためには、評価マニュアルによる時間価値を t^* と表わした場合、制約条件(25)、(26)に関する未知パラメータ (l^*, w^*) のうちの1つは、 t^* を所与としたもう一方のパラメータの関数として与え（たとえば、 $l^* = t^* \cdot w^*$ として与え）、時間価値を所与とした時間信頼性比 $(u/t = g^* \cdot t^* / l^*)$ を推計する問題に変換することが必要となる。こうした問題の変換は容易に行うことが可能である。

時間価値を固定化したとしても、評価対象とするプロジェクトによって時間信頼性価値が異なることは望ましくはない。なぜなら、対象プロジェクト毎に信頼性比を推計する必要性があり、そのためには多くの時間と労力が投入されなければならない等の問題が生じるからである。理論的には、対象ネットワークの混雑状況に応じて、時間価値・時間信頼性価値は変化する^{37) 39)}ものではあるが、交通プロジェクト評価への適用を前提に考えた場合、時間信頼性比も固定化することが必要であろう。そのためには、多くの交通プロジェクトを対象とした時間信頼性比の推計を行い、時間信頼性比の標準値を設定することが必要となるであろう。

(4) 時間信頼性向上による便益推計

(1)では、需要面および供給面のネットワークにおける不確実性の推計可能性に関する考察を行った。需要面では、実務で扱う大規模なネットワークを対象とした場合、現段階では、確率的OD交通量を観測データから推計することは困難であることを示した。一方、供給面に関しては、確率的交通容量に関するリンク間の相関まで推計することは、現段階では無理かもしれないが、リンクの確率的交通容量の推計は可能であることを示した。

(2)では、リスク回避的なドライバーの経路選択行動に関する考察を行った。ここでは、プロジェクト評価への適用を想定した場合、経路選択問題においては、解の一意性が保証されることが極めて重要となることを示した。そのためには、確定的OD交通量および互いに独立なリンク交通容量を仮定して、リスク回避的なドライバーの経路選択問題を定式化する必要があることも示した。また、このことは(1)で需要面、供給面に関わる不確実性の推計可能性について述べた結論と矛盾するものではない。ここで注意が必要な点は、移動時間信頼性推計において、筆者は交通需要が確率変動することによる影響を無視できると主張しているわけではなく、むしろ、それは重要な移動時間の変動要因であると認識しつつも、交通需要の確率変動を仮定するよりも無視した方がプロジェクト評価という観点からは、問題が少ないと考えていることである。また、OD交通量の変動は、将来OD交通量推計に関わる問題が主であると考え、その影響は、便益が確率変動すると捉える先述した推計法の適用によって対応可能である。

(3)では、時間価値・時間信頼性価値の推計に関する考察を行った。これらの推計に際しては、ネットワークレベルでドライバーの経路選択行動を内生化することの重要性を示した。さらに、時間価値は現行マニュアルで示したものを採用し、信頼性比のみを多くの事例から推計し、その標準値を設定する必要性を示した。

以上をまとめると、時間信頼性向上による便益評価の実用化に際して、関係する推計法が満たすべき条件として、

①リスク回避的なドライバーの経路選択行動を解の一意性の保証された問題（たとえば、式(31)と関係する制約条件から構成される最適化問題）として定式化する

ことが挙げられる。そのためには、

②移動時間信頼性の指標を移動時間の分散とした上で、移動時間の確率変動要因としては、互いに独立な確率的リンク交通容量のみを想定する

ことが必要となる。時間価値に関しては現行のマニュアルによるものを採用した上で、信頼性比の標準値を新たに設定することが必要となるであろう。ここで示した条件を満たす便益推計法では、移動時間短縮だけではなく、移動費用削減、移動時間信頼性向上による便益もネットワークモデルから同時に推計されるという点で現行の推計法とは大きく異なるものと考えられる。すなわち、交通事故削減による便益以外はネットワークモデルから直接推計されることになる。ここで示した便益推計法では、実用上要求される透明性、わかりやすさは、少なくとも確保されているものと考えられる。

一方、課題も存在する。1つ目の課題としては、リンクの移動時間関数、移動費用関数をどのように設定するかが挙げられる。移動時間関数については、たとえば、標準的な利用者均衡配分で適用されるBPR関数を用いれば、内田³⁾・^{10)・11)}で示した方法を適用することにより、平均移動時間、移動時間信頼性は計算可能であると考えられる。しかしながら、確率的交通容量と整合的なBPR関数のパラメータをどのように推計するのか等の課題は残されている。これらは、これまで交通容量を扱う研究、ネットワークモデルを扱う研究は、それぞれが独立に行なわれており、両者を有機的に関係付ける試みが少なかったことに起因するものと考えられるが、重要な研究課題である。一方、移動費用関数に関しては、現行のマニュアルで示されている移動速度と移動費用の関係で代用することが考えられるが、内田³⁾で指摘されているように、リンクの移動費用はリンク交通量に関する単調増加関数とはならないという問題点がある。しかしながら、先述した通り、式(28)に示したリンク評価値が交通量に関する単調増加関数となることが期待されるため、そのための実証研究の進展が望まれる。さらに、適用する関数形によって、リスク回避的なドライバーの経路選択行動を介して、時間価値・時間信頼性価値が決定されると考えられるため、移動時間関数、移動費用関数のさらなる精緻化は重要課題であると捉えられる。

2つ目の課題としては、異なる分析期間を前提とする推計法をどのように統合化するかという点にある。すなわち、プロジェクト評価を行うためには、日単位の交通データに基づいたドライバーの経路選択問題を考える必要があり、日単位の交通量配分(日配分)を行う必要がある。日配分を行うためには、本稿でとりあげた時間交通容量を日交通容量に変換する必要がある。日交通容量を前提とした、BPR関数のパラメータ値も推計しなければならない。時間交通容量を日交通容量に変換するための手法は、いくつか提案されている。たとえば、溝上ら³⁾や松井・藤田⁴⁾を参照されたい。こうした手法を適用することにより、時間単位の確率的交通容量を日配分への入力データに変換することが可能となると考えられる

が、統一された手法があるわけではなく、残された課題も多い。また、こうした課題は、現行の評価マニュアルによる方法においても全く同様に存在することに注意が必要である。

本稿で紹介したネットワークにおける移動時間信頼性を考慮した便益評価のための要素技術は、必ずしも、観測データに基づく十分な検証がなされているわけではなく、すぐに実用化できる段階にあるとは言えない。したがって、その実用化のためには、実データに基づく十分な検証が今後必要となることは言うまでもない。

7. おわりに

本稿では、道路ネットワークに焦点を当て、移動時間信頼性に影響する要因を整理すると共に、移動時間信頼性を考慮した交通プロジェクトの便益評価のための要素技術を紹介した。その上で、移動時間信頼性向便益の推計法が満たすべき条件を整理し、それに適合する便益推計法を示した。さらに、移動時間信頼性を考慮した便益評価の実用化に向けて残された課題についてまとめた。

適用する手法に課題が残されているからといって、プロジェクトの評価を行わないという訳にはいかない。現在のマニュアルで採用されている三便益についても、いくつかの課題を抱えながら、それを承知の上で、それらに基づいた交通プロジェクトの効率性評価は行われている。このことと、近年の時間信頼性に関わる研究の進展を考えると、交通プロジェクト評価において時間信頼性向上便益を考慮しない理由は少なくなりつつあると考えられる。もちろん、課題は解決されるべきであり、そのための研究活動は今後も必要である。

ネットワークにおいて交通プロジェクトを実施した場合、移動時間信頼性向上による便益は、明らかに発生する。さらに、研究の蓄積も図られつつあり、ある条件の下では、ネットワークレベルで移動時間信頼性を考慮した便益を適切に推計できるようになったと考えられる。ただし、移動時間信頼性を考慮した便益評価の実用化に際しては、関係推計技術の観測データに基づいた十分な実証がなされなければならないことは、先述したとおりである。こうしたプロセスを経て、近い将来、ネットワークにおける移動時間信頼性に関する研究成果が実用化されるものと確信している。本稿がネットワークにおける移動時間信頼性研究の実用化に少しでも貢献することを願ってやまない。

謝辞：初めに、本講演の機会を頂いた、土木計画学研究委員会に感謝の意を表したい。

筆者の交通ネットワークに関する研究は、修士課程在学中に現・北海商科大学教授（当時・北海道大学教授）の佐藤馨一先生に指導を受けたことに始まる。またその時、現・専修大学松戸中学校高等学校校長（当時・専修大学北海道短期大学教授）の栢谷有三先生には、交通ネットワークに関わる基礎理論だけではなく、さまざまな面でご指導を頂いた。この場を借りて心から感謝とお礼の言葉を申し上げたい。

参考文献

- 1) 朝倉康夫, 柏谷増男, 熊本仲夫: 交通量変動に起因する広域道路網の信頼性評価, 土木計画学研究・論文集, No.7, pp.235-242.
- 2) Asakura, Y. and Kashiwadani, M.: Road network reliability caused by daily fluctuations of traffic flow, in 'Proceedings of the 19th PTRC Summer Annual meeting', Brighton, pp.73-84, 1991.
- 3) 内田 賢悦: 需要・供給・認知の確率変動を反映した利用者均衡配分, 土木学会論文集 D, Vol. 65, No. 3, pp.386-398, 2009.
- 4) Watling, D.: User equilibrium traffic network assignment with stochastic travel times and late arrival penalty, *European Journal of Operational Research*, Vol.175, pp.1539-1556, 2006.
- 5) 費用便益分析マニュアル, 国土交通省道路局都市・地域整備局, 2008.
- 6) Brownstone, D. and Small, K. A.: Valuing Time and Reliability: Assessing the evidence from road pricing demonstrations, *Transportation Research Part A*, Vol.39, pp.279-293, 2005.
- 7) 中山晶一朗: ネットワークレベルでの道路交通の信頼性研究の諸相・展望とその便益評価の一考察, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol. 67, No. 2, pp.147-166, 2011.
- 8) 中山晶一朗: 道路の時間信頼性に関する研究レビュー, 木学会論文集 D3(土木計画学), Vol. 67, No. 1, pp.95-114, 2011.
- 9) 福田大輔: 旅行時間変動の価値づけに関する研究展望とプロジェクト評価への適用に向けた課題の整理, 土木計画学研究・論文集, Vol. 27, pp. 437-448, 2010.
- 10) 内田賢悦: 交通容量の確率的変動が道路ネットワークの移動時間に与える影響に関する研究, 土木学会論文集 D, Vol. 66, No. 4, pp.431-441, 2010.
- 11) 内田賢悦: 移動時間信頼性を考慮した需要変動型均衡配分モデル, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 67, No. 1, pp.60-69, 2011.
- 12) Uchida, K.: A study on estimation methods for values of travel time and travel time reliability in road network, *Proceedings of The 5th International Symposium on Transportation Network Reliability* (Accepted).
- 13) Hazelton, M.: Estimation of origin-destination matrices from link flows in uncongested networks. *Transportation Research Part B*, 34, pp.549-566, 2000.
- 14) Hazelton, M.: Inference for origin-destination matrices: estimation, prediction and reconstruction. *Transportation Research Part B*, 35, pp.667-676, 2001.
- 15) Clark, S. D., and Watling, D. P.: Modelling network travel time reliability under stochastic demand. *Transportation Research*, 39B(2), pp.119-140, 2005.
- 16) Brilon, W., Geistefeldt, J. and Regler, M.: Randomness of capacity? Idea and application, *Proceedings of the 5th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service*, pp.147-157, 2006.
- 17) Geistefeldt, J. and Brilon, W.: A comparative assessment of stochastic capacity estimation methods, *Transportation and Traffic Theory 2009*, W.H.K Lam, S.C. Wong and Hong K. Lo (Eds.), pp.583-602, 2009.
- 18) Van Aede, M.: A single regime speed-flow-density relationship for freeways and arterials, *Proceedings of the 74th TRB annual meeting*, Washington D.C., 1995.
- 19) Van Aerde, M. and Rakha, H.: Multivariate calibration of single regime speed-flow-density relationships, *Proceedings of the vehicle navigation and information systems (VNIS), conference*, Seattle, Washington, 1995.
- 20) Chandler, R. E., Herman, R. and Montroll, E. W.: *Traffic Dynamics: Studies in Car Following*, Operations Research, Vol. 6, pp.165-184, 1958.
- 21) Herman, R., Montroll, E. W., Potts, R. B. and Rothey, R. W.: *Traffic Dynamics: Analysis of Stability in Car Following*, Operations Research, Vol. 7, pp.86-106, 1959.
- 22) Gazis, D. C., Herman, R. and Potts, R. B.: *Car Following Theory of Steady State Traffic Flow*, Operations Research, Vol. 7, pp.499-505, 1959.
- 23) Herman, R. and Potts, R. B.: *Single Lane Traffic Theory and Experiment*, *Proceedings of the Symposium on Traffic Flow Theory*, Research Laboratories, General Motors, New York: Elsevier, pp.147-157, 1959.
- 24) Gazis, D. C., Herman, R. and Rothey, R. W.: *Non Linear Follow the Leader Models of Traffic Flow*, Operations Research, Vol.9, Issue 4, pp.545-567, 1961.
- 25) Norman, R. D., Harry, S.: *Applied Regression Analysis*, Wiley Series in Probability and Statistics, John Wiley & Sons, 1998.
- 26) Fosgerau, M. and Engelson, L.: The value of travel time variance, *Transportation Research Part B* 45, pp.1-8, 2011.
- 27) Lo, H. K. and Chen, A. (2000) Traffic equilibrium problem with route-specific costs: Formulation and algorithms, *Transportation Research* 34B(6), pp.493-514.
- 28) Becker, G.S.: A theory of the allocation of time. *Economic Journal* 75 (299), pp.493-517, 1965.
- 29) DeSerpa, A. C.: A theory of the economics of time, *The Economic Journal*, 81 (324), pp.828-846, 1971.
- 30) Fosgerau, M. and Karlstrom, M.: The value of reliability, *Transportation Research Part B* 44, pp.38-49, 2010.
- 31) Uchida, K. and Munehiro, K.: Impact of stochastic traffic capacity on travel time in road network, *Transportation Research Board 89th Annual Meeting CD-ROM*, 2010.
- 32) 内田賢悦: 二酸化炭素排出量最小化原則に基づく均衡配分モデルの提案, 環境システム研究論文集Vol.38, pp.101-108, 2010.
- 33) Cobb, C. W., and Douglas, P. H.: A Theory of Production. *American Economic Review* 18 (Supplement), pp. 139-165, 1928.
- 34) Gartner, G. H.: Optimal traffic assignment with elastic demands: A review part II, *Transportation Science* 14, pp. 174-191, 1980.
- 35) Lasdon, L.: *Optimization Theory for Large Systems*, Macmillan, New York, 1970.
- 36) 土木学会: 交通ネットワークの均衡分析ー最新の理論と解法ー, 1998.
- 37) 河野達仁, 森杉壽芳: 時間価値に関する理論的考察 -私的交通のケース-, 土木学会論文集No.639/IV-46, pp.53-64, 2000.

- 38) 加藤浩徳, 小野田恵一, 木全正樹: 交通時間と交通時間節約価値との関係に関する分析—観光目的の都市間幹線交通を事例として—, 運輸政策研究, 運輸政策研究, Vol.9, No.2, pp.2-14, 2006.
- 39) 溝上障志, 松井寛, 可知隆: 日交通量配分に用いるリンクコスト関数の開発, 土木学会論文集, No.401/IV-10, pp.99-107, 1989.
- 40) 松井寛, 藤田素弘: 大都市圏道路網を対象とした拡張型利用者均衡配分モデルの開発とその実用化, 土木計画学研究・論文集, No.17, pp.15-28, 2001.
2012. 9. 21 受付

ISSUES AND FUTURE PROSPECT TOWARD PRACTICE OF BENEFIT EVALUATION CONSIDERING TRAVEL TIME RELIABILITY IN ROAD NETWORK

Kenetsu UCHIDA

In this study, factors which have an influence on travel time reliability in road network are clarified. Estimation models associated with benefit evaluation considering travel time reliability are then presented. The models presented in this study have been selected mainly from the models developed by the author. Conditions which should be satisfied by the benefit estimation models are presented next. Finally, issues and future prospect toward practice of benefit evaluation considering travel time reliability in road network are presented.